

УДК 621.187.14

Э.Г.БРАТУТА, д-р техн. наук, А.Н.ГАНЖА, канд. техн. наук, Е.П.СЛЕСАР  
*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

### **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРОВОДЯНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ СХЕМЫ ТУРБОБЛОКА МОЩНОСТЬЮ 300 МВт**

На основе предложенной ранее математической модели анализируется работа системы регенерации низкого давления турбоблока мощностью 300 МВт на гарантийных режимах. Описываемый программный комплекс может быть использован для исследования режимов как действующих, так и вновь проектируемых или модернизированных подогревателей регенеративных схем мощных паротурбинных энергоблоков.

В настоящее время уделяют большое внимание вопросам уменьшения энергопотребления и энергосберегающим технологиям. В сбережении энергетических ресурсов большое значение имеет также и снижение себестоимости производства самой электрической энергии, т.е. повышение эффективности установок, которые её вырабатывают. Основная часть электрической энергии, как в Украине, так и за рубежом, генерируется на тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электрических станциях. В качестве генерирующей электрическую энергию агрегата здесь используются энергоблоки с мощными паротурбинными установками (ПТУ), где используется общеизвестный цикл Ренкина.

Как показывает наука и практика, эффективность цикла Ренкина, т.е. его КПД, существенно возрастает, если в нем применять регенеративный подогрев питательной воды, поступающей в парогенератор. Основной вклад в регенерацию на ПТУ вносит подогрев питательной воды и основного конденсата паром из отборов турбины. Следует отметить, что с применением такой регенерации полезно используется теплота, которая сбрасывается в конденсаторе. При этом еще и снижается загрязнение окружающей среды.

Регенеративный подогрев осуществляется в основном системой поверхностных кожухо-трубчатых пароводяных теплообменников – подогревателей низкого (ПНД) и высокого (ПВД) давлений. В основной своей части ПНД и ПВД отечественных паротурбинных энергоблоков не проектировались и не изготавливались в Украине, а их общее количество и металлоемкость весьма значительны. Вес некоторых подогревателей может составлять до 100÷150 т, диаметр до 3,5 м, высота до 10 м и более [1–3]. Кроме того, стоимость этих аппаратов на ТЭС может составлять до 15 % стоимости турбины, а на АЭС – сопоставима со стоимостью турбины. Отечественные поверхностные ПНД изготавливаются камерного типа с U- или П-образными трубами из латуни, медно-никелевых сплавов или нержавеющей стали, а ПВД –

спирально-коллекторного типа с трубами (коллекторами, спиральными змеевиками) из углеродистой стали 20. Зарубежные ПВД также изготавливаются и камерного типа с U- или П-образными трубами.

Проблема снижения металлоемкости и стоимости подогревателей может быть решена использованием смешивающих (контактных) теплообменников. Однако такие аппараты в эксплуатации пока менее надежные, чем поверхностные, и их использование в настоящее время ограничено вакуумными отборами на небольшой части энергоблоков, где они более или менее эффективно работают [2]. Применение более надежных смешивающих подогревателей на более высокие давления является одним из перспективных направлений повышения эффективности, снижения затрат на изготовление и металлоемкости регенеративной системы современных ПТУ. Поэтому в настоящее время поверхностные пароводяные теплообменники вносят основной вклад в обеспечение и повышение экономичности ТЭС, ТЭЦ и АЭС.

Построенные 30-40 лет назад отечественные энергоблоки уже практически выработали или подходят к выработке установленного паркового ресурса. Поэтому, для увеличения (продления) этого ресурса у существующих или для создания новых энергоблоков (мощностей) возникает необходимость в анализе эффективности и надежности как вновь проектируемых или модернизируемых, так и действующих пароводяных теплообменников в системах регенерации ПТУ.

Традиционно сложилось, что в расчетах и проектировании поверхностных ПНД и ПВД используются в основном нормативные [3] и другие инструктивные и методические материалы, в основе которых заложены упрощенные математические модели. Такой подход может быть пригоден только для оценочных расчетов на начальной стадии разработки конструкции этих аппаратов. Единственной искомой величиной в таких расчетах является поверхность теплообмена. Из-за того, что в этом случае не известно, как аппараты будут работать на нерасчетных (неноминальных) режимах и в эксплуатации, поверхность теплообмена обычно закладывается с запасом 40–60% выше рассчитанной, что существенно увеличивает металлоемкость, затраты на изготовление, эксплуатацию и конечную стоимость теплообменников. Кроме того, расчеты проводятся только на номинале (режиме 100 % установленной мощности энергоблока). На других гарантийных режимах работы ПТУ параметры на выходе из подогревателей определяются только из уравнений теплового баланса с использованием эффективности теплообменников, выполненной в оценочных расчетах при проектировании. Такой подход приводит к неточностям в определении

подогрева питательной воды во всей регенеративной системе, как на номинале, так и других (частичных) режимах работы энергоблока.

Реальные параметры теплоносителей на выходе из подогревателей, внутри них и после группы подогревателей (системы регенерации) можно определить с помощью экспериментов (промышленных испытаний) или поверочных (обратных) расчетов, как отдельных аппаратов, так и их групп. Поверочный (обратный) расчет осуществляется по заданным конструкциям аппаратов (т.е. поверхностям теплообмена), а также с учетом условий их эксплуатации (наличие слоев коррозии и отложений, присосов воздуха и др.). При этом математическая модель должна как можно более полно отражать все физические процессы, происходящие внутри подогревателей с учетом условий эксплуатации, а также их конструктивные особенности, схемы соединения (компоновки) аппаратов в тепловой схеме ПТУ.

Ядро уточненной и дополненной обобщенной математической модели поверхностных подогревателей составляют известные уравнения теплового баланса теплоносителей и теплопередачи через трубы поверхности нагрева [2–7], как в характерных зонах аппаратов и их участков, так и для всего теплообменника и их группы в целом. Характерные зоны определяются фазовым состоянием греющего теплоносителя – зона охлаждения пара (ОП), конденсации пара (КП) и охлаждения конденсата (ОК). Система уравнений также включает в себя следующие основные зависимости [2–7]:

- критериальные уравнения для определения коэффициентов теплоотдачи;
- температурные характеристики (средние температурные напоры, средние и локальные температуры теплоносителей и стенок труб);
- гидравлические характеристики (коэффициенты сопротивлений и потери давления теплоносителей, уравнения неразрывности);
- конструктивные характеристики;
- эксплуатационные характеристики (наличие на поверхности труб ржавчины (продуктов коррозии и отложений), неконденсирующихся газов (воздуха) в корпусе и потерь теплоты через изоляцию корпуса).

Такую сложную нелинейную систему уравнений с множеством неизвестных сразу решить невозможно, поэтому она решается методом последовательных приближений, как для отдельных участков и характерных зон, так и для всего аппарата и их группы в целом [7]. Для ускорения сходимости процесса последовательных приближений (итераций) в созданном алгоритме используется модифицированный метод хорд.

Расчет потерь давлений по ходу движения теплоносителей с греющей и нагреваемой стороны в ПНД и с греющей стороны в ПВД на участке ведется совместно с тепловым расчетом. Поэтому тепловые и гидравлические параметры в итоге получаются взаимосвязанными. Потери давления питательной воды в каждом змеевике и трубопроводе спирально–коллекторных ПВД (нагреваемая сторона) вычисляются отдельным расчетом коллекторных систем [7]. Для этого используются элементы теории графов [8, 9]. Распределение расходов в узлах и ветвях (дугах, ребрах) такого графа описывается законами Кирхгофа. Нелинейная система уравнений решается итерационным методом поправочных контурных расходов [9] с вычислением поправок по методу Ньютона в комбинации с методом Гаусса. В результате можно точно вычислить расходы в характерных зонах ПВД, которые регулируются дроссельными шайбами и перепускными трубопроводами, и определить гидравлические неравномерности работы отдельных змеевиков в этих зонах. Как показывает многолетняя практика эксплуатации ПВД энергоблоков, такие неравномерности влияют на тепловую эффективность и, особенно, на надежность и ресурс их работы.

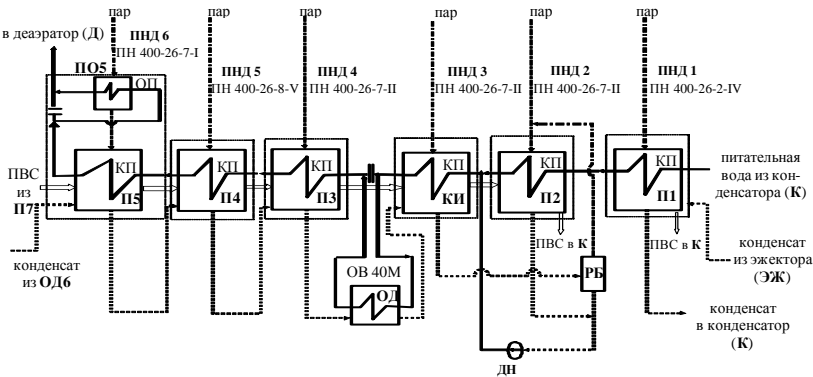
Все исходные конструктивные и режимные параметры для расчета подогревателей и систем регенерации в целом хранятся в базе данных. Созданный на базе разработанной системы взаимосвязанных математических моделей и алгоритмов программный комплекс позволяет изменять эти параметры в диалоговом окне и запоминать в базе данных. Посчитанные с помощью программного комплекса тепловые и гидравлические параметры внутри каждого аппарата по зонам и участкам (давления, температуры, тепловые потоки, коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, температурные напоры с поправочными коэффициентами и др.) выводятся в отдельные файлы.

Расчеты подогревателей в системах регенерации высокого и низкого давления на гарантийных режимах работы одного из энергоблоков были сопоставлены с контрольными данными промышленных испытаний. Сопоставление этих данных показало, что различие результатов лежит в пределах абсолютной погрешности измерения параметров греющего пара и питательной воды, что свидетельствует об адекватности математической модели и алгоритма расчета.

В таблице приведены данные анализа эффективности работы системы регенерации низкого давления энергоблока мощностью 300 МВт (см. рисунок) на гарантийных режимах с разными вариантами материалов труб поверхностей нагрева ПНД (латунь Л-68 и ЛО70-1, нержавеющая сталь 08X18H10T), регламентированных к применению в таких аппаратах нормативными документами.

Эффективность работы ПНД энергоблоков мощностью 300 МВт

Нагрузка турбоблока	Температура питательной воды на входе в деаэратор, °С	Расход пара, т/ч		Тепловые потери в конденсаторе, кВт	Дополнительный расход условного топлива, т/год
		выход в конденсатор из ПНД-2	выход в конденсатор из ПНД-1		
материал труб ПНД – латунь Л-68					
100%	159,52	0,381	-	291	313
85,2%	150,56	-	-	-	-
64,7%	142,63	-	-	-	-
52,1%	132,92	-	-	-	-
49%	132,13	-	-	-	-
42,7%	129,63	-	-	-	-
материал труб ПНД – латунь ЛО70-1					
100%	159,53	0,377	-	289	311
85,2%	150,56	-	-	-	-
64,7%	142,63	-	-	-	-
52,1%	132,92	-	-	-	-
49%	132,13	-	-	-	-
42,7%	129,63	-	-	-	-
материал труб ПНД сталь 08Х18Н10Т					
100%	158,52	0,385	1,180	1151	1238
85,2%	150,11	0,374	-	286	308
64,7%	142,44	0,114	-	88	95
52,1%	132,91	-	-	-	-
49%	132,12	-	-	-	-
42,7%	129,63	-	-	-	-



Система регенерации низкого давления турбоустановки К-300-240 ХТГЗ

Определение тепловых потерь от неполной конденсации пара в системе ПНД производилось с учетом того, что несконденсированный

пар из ПНД-1 и 2 сбрасывается в конденсатор. Превышение теплосодержания этого пара над теплосодержанием основного конденсата ассимилируется циркуляционной водой, при этом расход основного конденсата в ПНД-1 увеличивается за счет сбрасываемого пара из ПНД-2, а расход дренажа по линии перекачивания уменьшается. При этом происходит перераспределение потребляемой мощности между конденсатными и дренажными насосами. Подсчет дополнительного расхода условного топлива производился в предположении, что тепловые потери в конденсаторе необходимо компенсировать в парогенераторе (для обеспечения первоначальной мощности энергоблока) дополнительно подведенной теплотой от сжигания топлива к менее нагретой в регенеративной системе питательной воде.

Как видно из результатов анализа (см. таблицу), эффективность работы системы регенерации низкого давления существенно зависит от свойств материала трубок поверхности нагрева. Эффективнее всего работают более дешевые латунные трубки по сравнению с нержавеющей сталью. Максимальные тепловые потери от неполной конденсации пара в ПНД с латунными трубками в 4 раза меньше, чем в ПНД с трубками из нержавеющей стали. Однако латунные трубки подвержены эрозионно-коррозионному износу. Затраты от вынужденных замен энергоблоков и замены латунных трубок из-за износа могут перекрыть потери от использования дорогих и неэффективных трубок поверхности нагрева из нержавеющей сталей.

Кроме того, проводился анализ влияния присосов воздуха в вакуумные ПНД-1 и 2 на эффективность работы систем регенерации низкого давления исследуемых энергоблоков. Показано, что присосы воздуха значительно влияют на работу этих подогревателей, а, следовательно, – и на всю регенеративную систему, в связи с увеличивающимся при этом сбросом недоконденсированного пара в конденсатор и недогревом питательной воды.

На примере анализа работы системы регенерации турбоблока К-300-240 ХТГЗ показано, что разработанные уточненные математические модели, алгоритмы и программные комплексы могут использоваться для исследований режимов как действующих, так и вновь проектируемых или модернизируемых подогревателей и систем регенерации. Кроме того, представленная методика позволяет выбирать из существующей номенклатуры подогревателей [1] аппараты для проектируемых тепловых схем ПТУ энергоблоков на основе комплексного анализа эффективности их работы путем поверочных (обратных) расчетов. Разработанные программные комплексы могут быть составной частью в математических моделях, программах и алгоритмах расчета

всей тепловой схемы турбоустановок с произвольным структурным решением.

1. Каталог 18-2-76. Теплообменное оборудование. – М.: НИИЭнформэнергомаш, 1977. – 203 с.
2. Марушкин В.М., Ивашенко С.С., Вакуленко Б.Ф. Подогреватели высокого давления турбоустановок ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
3. РТМ 108.271.23-84. Расчет и проектирование поверхностных подогревателей высокого и низкого давления. – М.: МЭМ, 1984. – 216 с.
4. Исаченко В.Н., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
5. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
7. Ганжа А.Н. Пароводяные теплообменники энергоустановок ТЭС и АЭС. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – 169 с.
8. Берж К. Теория графов и ее применение. – М.: ИЛ, 1962. – 319 с.
9. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / В.Н.Хасилев, А.П.Меренков, Б.М.Качанович и др. – М.: Энергия, 1978. – 175 с.

*Получено 17.02.2004*

УДК 535.24, 66.021.3

А.Ф.СТРОЙ, д-р техн. наук, Е.Б.ЧУМУРИНА

*Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка*

## **СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛОМАСООБМЕН ПРИ СУШКЕ МАТЕРИАЛОВ**

Получена математическая модель сопряженного тепломассообмена при сушке материалов.

Основной проблемой при сушке материалов является снижение энергозатрат и уменьшение длительности процесса сушки. Решение этой проблемы возможно только при достаточно глубоком изучении процессов тепло- и влагопереноса в материале и изменении тепло-влажностных характеристик агента сушки.

Анализ исследований, включая работы [1-3] в этой области, свидетельствует о том, что тепло- и влагоперенос в материале рассматривают без учета изменений в процессе сушки тепловлажностных характеристик агента сушки. Существуют практические рекомендации [4-6] для выбора параметров агента сушки. Однако без достаточно глубокого изучения влияния этих параметров на процесс тепло- и влагопереноса в материале, трудно судить о том, насколько эти рекомендации соответствуют оптимальным энергетическим затратам. Изучить влияние параметров агента сушки на процесс тепло- и влагопереноса и оп-